

增材制造钛合金凝固晶粒调控研究进展

杨俊伟¹, 汤海波^{2,3}, 田象军^{2,3}, 朱言言^{2,3,4}

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

(2. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院, 北京 100191)

(3. 北京航空航天大学 大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 100191)

(4. 北京航空航天大学 宁波创新研究院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 钛合金由于比强度高、耐腐蚀好、高温性能好等优异的性能而广泛应用于航空航天、船舶、核电等领域。增材制造技术为大型整体关键钛合金构件的短周期、低成本制造提供了变革性途径, 但增材制造产生的粗大柱状晶组织导致了构件的各向异性, 限制了合金性能的充分发挥。进行晶粒调控以消除各向异性、提高力学性能成为近些年的研究热点。本文综述了增材制造钛合金构件典型晶粒形貌及形成机制, 阐述了国内外在增材制造钛合金晶粒调控方面的研究进展, 包括工艺参数优化、微合金化改性与新合金成分设计、外加能量场、后续热处理、新型增材制造工艺和多种方法复合等, 总结了各类方法的调控机制和调控效果, 对增材制造钛合金凝固晶粒调控的未来发展提出了思考与展望。

关键词: 增材制造; 钛合金; 晶粒调控

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)09-3316-16

先进飞机、航空发动机、重型运载火箭、高超音速飞行器、大型船舶等新一代航空航天航海高端装备对高效能、高可靠、轻量化、长寿命等技术指标的要求日益提升, 使钛合金等轻质金属关键承力构件日趋大型化、整体化、复杂化、高性能化, 对制造技术的要求和挑战日益严苛。增材制造使用激光、电弧、电子束和等离子弧等热源, 对粉体或丝材等原料进行加热熔化或烧结, 逐点逐层堆积成形为三维构件, 具有近净成形、组织均匀致密、综合力学性能优异、加工周期短、材料利用率高、适用于高熔点难加工材料、对设计快速响应等一系列优势, 为钛合金等高性能难加工金属材料的大型复杂整体构件的制造提供了变革性技术途径^[1-6]。经过20多年的发展, 激光增材制造钛合金关键构件逐渐在航空航天领域实现装机工程应用^[7-9]。

对广泛应用的熔化/凝固成形类增材制造技术, 如激光定向能量沉积 (LDED)、选区激光熔化 (SLM) 和电弧-丝增材制造 (WAAM) 等, 由于其超高能量的冶金过程完成于逐点扫描的小熔池内, 成形过程中熔池底部通常有极高的温度梯度, 使得增材制造钛合金构件凝固组织一般倾向于形成沿着沉积增高方向 (z 向) 外延生长、贯穿多个沉积层的粗大原始 β 柱状晶, 该组织存在较强的 $\beta < 001 > // z$ 向的组织。而在之后的 β - α 相变中,

由于 β 与 α 两相之间存在 Burgers 取向关系, 由 β 转化成的 α 相也存在一定程度的组织, 导致最终构件力学性能存在一定的各向异性: 通常沿沉积方向具有较低的强度和较高的塑性, 而垂直于沉积方向与之相反^[10-14]。这一差异限制了材料性能的充分发挥, 也使得后续热处理性能调控效果受到限制, 难以保证不同方向的性能同时达到预期, 尤其对高强钛合金而言, 平衡其多个方向的强度与塑性的难度较大^[15]。此外, 当前钛合金 (除 TiAl 与 Ti₂AlNb 等金属间化合物外) 服役温度最高可达 600 °C 左右^[16], 尚未见报道这一温度下钛合金有明显的晶界弱化, 因而除对损伤容限性能要求较高的部件外, 大多数研究依然希望通过调控手段获得细小等轴晶, 以期实现优异的综合力学性能^[17-18]。

针对增材制造钛合金的粗大柱状晶组织和性能各向异性的问题, 国内外开展了广泛的研究以调控增材制造钛合金的原始 β 晶粒组织, 以期获得细小的等轴晶, 主要通过工艺参数优化、微合金化和合金成分设计、外场辅助、后续热处理以及新型增材制造工艺等手段来调控凝固晶粒组织, 如图 1^[15,18-25]。同时, 基于以上手段, 也有研究者开展了相关仿真模拟研究。本文阐述了国内外增材制造钛合金凝固晶粒等轴化与细化调控的相关研究进展, 对各类手段的调控效果进行了总结比较, 同时

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 国防科工局配套项目 (JPPT-135-GH-2-036); 国家自然科学基金 (52071005)

作者简介: 杨俊伟, 男, 1993年生, 博士生, 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191, E-mail: yangjw@buaa.edu.cn

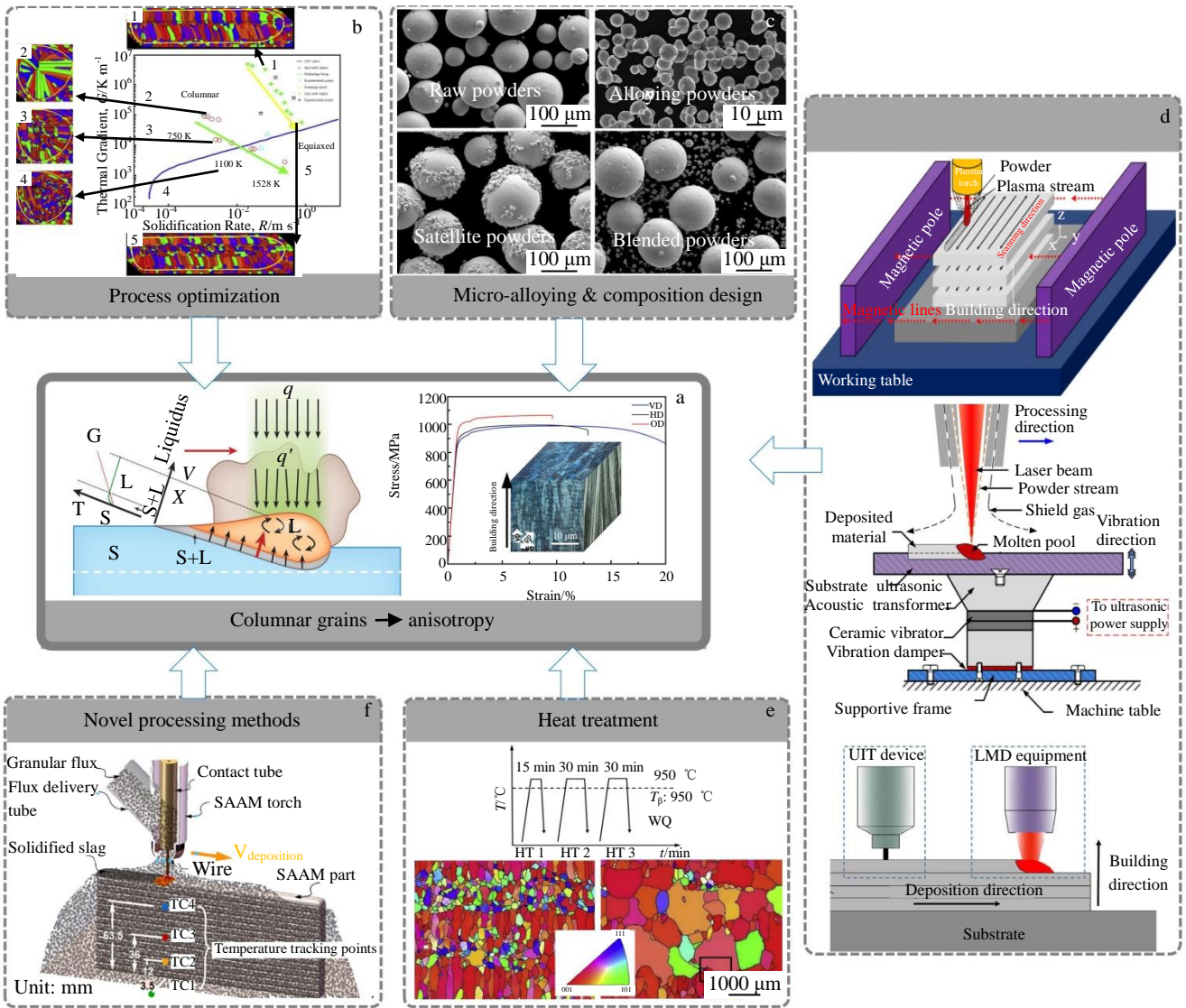


图 1 增材制造钛合金性能各向异性及常见晶粒调控手段

Fig.1 Anisotropy and common grain control methods of additively manufactured titanium alloys: (a) solidification columnar crystal and tensile anisotropy of additively manufactured molten pool^[15,18]; (b) solidification diagram and optimization of process parameters^[19]; (c) micro-alloying and composition design of powders^[20]; (d) external field-assisted additive manufacturing coupled with magnetic field stirring, and ultrasonic vibration, and ultrasonic impact^[21-23]; (e) subsequent heat treatment^[24]; (f) new process method of submerged arc welding^[25]

对相关研究进行了一些思考和展望。

1 增材制造钛合金典型凝固晶粒形貌及形成机制简述

熔化/凝固的增材制造方式,如定向能量沉积(DED)和粉末床熔化成形(PBF)等手段中,凝固晶粒直接形成于小尺寸熔池的定向凝固中。如图 2a 所示,一般对成形构件中任意位置的一点而言,随着移动的激光束靠近和远离,该点先熔化形成熔池后凝固。该点的熔池在凝固初期温度梯度 G 极高,而凝固速率 R 较低,根据 Hunt 和 G ümann 等^[26-29]提出的 CET 转变模型,此时界面处

于稳定状态,定向生长倾向较强,底部原有晶粒倾向于外延生长形成柱状晶。激光远离后在该点的凝固过程中, G 逐渐降低而 R 逐渐升高,界面稳定性逐渐被打破,等轴晶形成倾向逐渐增大,甚至在熔池顶部会形成一定比例的等轴晶^[30-31]。但为了保证增材制造工艺良好的冶金质量,一般在沉积方向有一定的重熔深度,因此顶部的等轴晶往往在新沉积层的重熔作用下减少乃至消除,从而获得沿沉积方向的全柱状晶组织或柱等交替组织^[32]。沉积层内存在多个熔道的搭接,当搭接率较低时,熔池边缘搭接区的组织通常会与熔池中央有所区别。Wang 等^[30,33]指出,当扫描策略中新沉积层熔道位于前一沉积

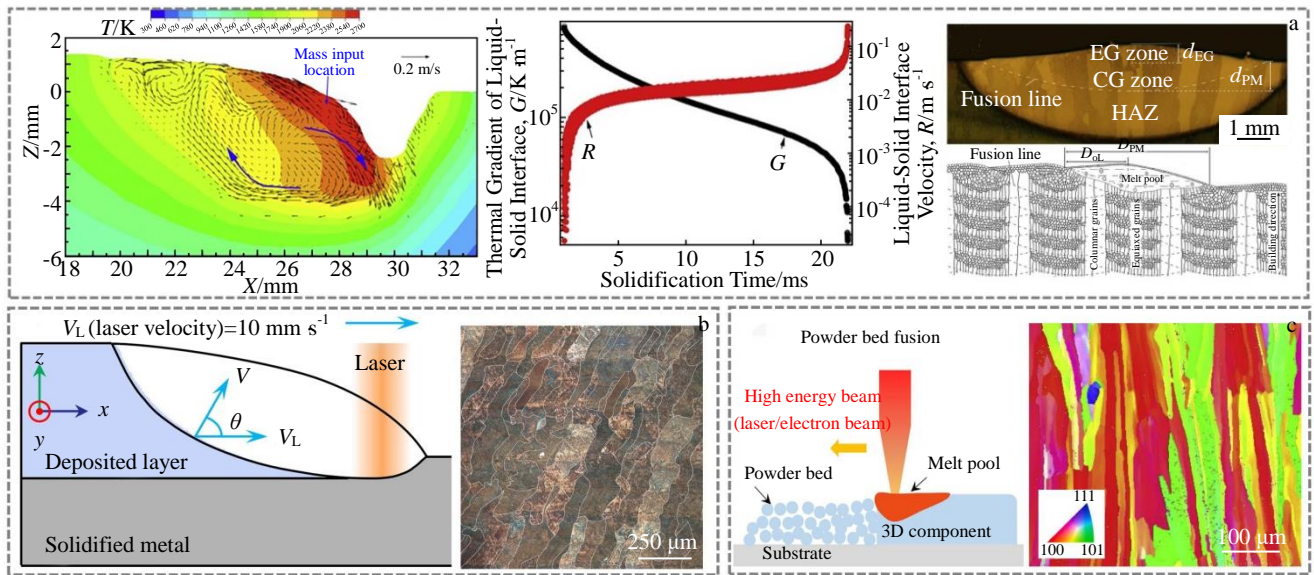


图 2 增材制造典型晶粒形貌及形成机制

Fig.2 Typical morphologies and formation mechanisms of grains in additive manufacturing: (a) temperature profile of melt pool, G - R variation with solidification time, and grain morphology of typical LMDed titanium alloy^[30,33]; (b) formation mechanism of tilted columnar grains^[34-35]; (c) typical columnar crystal structure of SLMed titanium alloy^[36-40]

层的两熔道搭接区时，这一搭接区倾向于形成柱状晶组织，而在最终的沉积构件中，沿搭接方向也会存在柱等交替组织，见图 2a。在部分增材制造方式中，柱状晶倾斜向上生长，与沉积方向成一定角度，这一角度由扫描速率和凝固速率的比值来决定，见图 2b^[34-35]。WAAM 工艺中，由于较大的热输入，其凝固速率较低，晶粒形貌与 LDED 有所区别，通常晶粒尺寸较后者略大^[8]。此外，对 SLM 方式而言，由于熔池尺寸小而能量密度较高，晶粒定向生长的倾向更大，往往形成长径比极大的细长柱状晶，见图 2c^[36-40]，这一工艺获得等轴晶的难度也相对较高。

学者们开展了广泛的研究来调控增材制造钛合金凝固晶粒形貌与尺寸，部分调控手段仍基于上述凝固理论。而一些新兴增材制造工艺，尤其是非熔化原料形式的增材制造工艺，其调控的机制与上述不同。下文将具体阐述当前常见的几类调控方法。

2 常见晶粒调控方法

2.1 工艺参数优化

增材制造是一种多参数的材料制备工艺，其可调控的工艺参数众多，如热源功率、扫描速率、扫描路径、层间搭接率、沉积层高度、原料送给速率、基板预热温度等^[41-42]。而钛合金相对于其他合金也具有良好的增材制造成形性和较宽的成形工艺窗口，这使得成形中在保证其冶金质量的前提下，进行工艺参数调整和优化以调

控凝固晶粒形貌变得可能^[43-44]。

在工艺参数优化中，主要是基于 Hunt^[26]和 G ümann^[27]等提出的 CET 转变模型的 G - R 凝固图来调整工艺参数，获得合适的温度梯度 G 和凝固速率 R 组合，进入凝固图谱的等轴晶区，如图 3a 所示，从而获得等轴晶组织^[18,26-27,34,45-47]。Bontha 等^[48]通过分析和仿真的手段，计算了热源功率和扫描速率对凝固晶粒的影响。Akram 等^[49]通过元胞自动机的方式，模拟了在 SLM, DED 和 EBM (电子束增材制造)中扫描策略对凝固晶粒形貌的影响，与试验结果吻合。在相关的试验中，预热基板或丝材可降低熔池底部温度梯度，从而促进等轴晶的形成^[19,50]。Wang 等^[51]在电弧增材制造 TC4 合金中，将丝材横向送入熔池中，使得熔池底部形成负的温度梯度以阻断柱状晶外延生长，而顶部由于晶粒横向生长而产生沿扫描方向的温度梯度。这一方法最终可制备含 80%等轴晶组织的构件，其力学性能各向异性得到降低，如图 3b 所示。一般而言，低的热输入和小的重熔深度有利于等轴晶的形成，而高的热输入会促进柱状晶的形成，如图 3c 所示^[19,40,50,52]。降低热输入的方式较多，如降低热源功率、使用脉冲热源、改变层间冷却时间^[53-54]、点扫描代替线扫描^[19]、冷金属过渡焊 (CMT)^[55]等。

脉冲热源除了可以降低热输入外，还可以对熔池产生搅拌作用，加速熔体对流降低温度梯度，从而进一步促进等轴晶的形成，如图 3d 所示。早在 1999 年，Sundaresan 等^[56]在电弧焊制备 TC4 合金中使用了 2~8 Hz

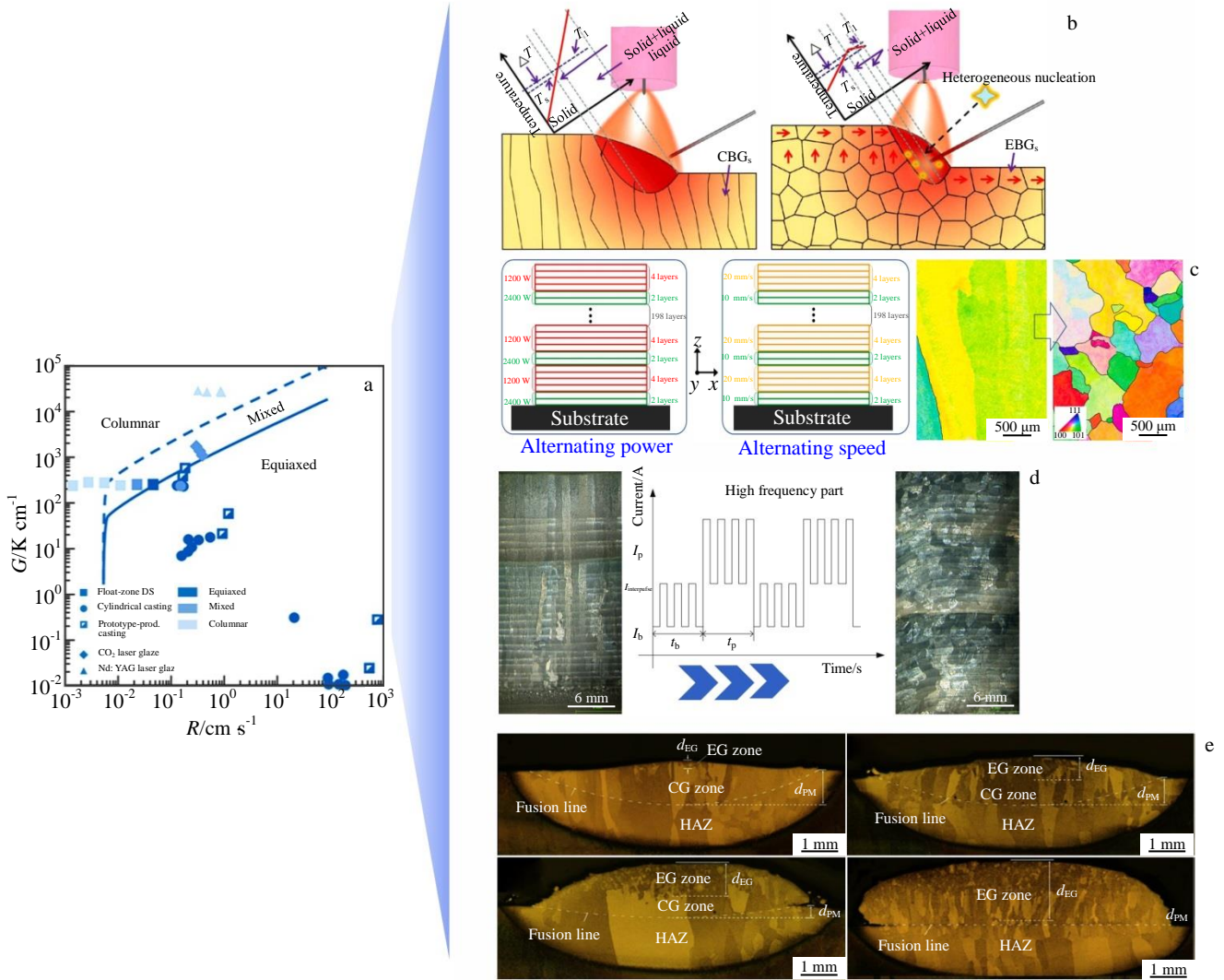


图 3 TC4 合金 $G-R$ 凝固图、横向送丝改变熔池温度梯度、降低热输入、脉冲电弧及增大送粉量提高等轴晶比例

Fig.3 $G-R$ solidification diagram of TC4 alloy^[18,26-27,34,45-47] (a); variation of temperature gradient of molten pool caused by transverse wire feeding^[48-51] (b); reduction in heat input^[19,40,50,52-55] (c); pulsed arc^[56-65] (d); increasing formation of equiaxed grains caused by faster powder feeding rate (e)^[66-70]

脉冲电弧，获得了等轴晶组织。之后，多位研究者采用 0.5~25 Hz 不等的低频脉冲电弧沉积 TC4 合金，均获得等轴晶组织，但频率变化对细化晶粒的作用不明显^[57-59]。而 Guo 等^[60]在电弧增材制造镁合金中，使用了 1~500 Hz 的脉冲电弧，通过调整脉冲频率，获得了不同的晶粒细化效果，其中频率为 5 Hz 时细化效果最大，从 39 μm 变为 21 μm ^[60]。Chen 等^[61]和 Ravi 等^[62]分别在激光直接沉积 TC4 合金和激光-等离子弧增材制造奥氏体钢中，使用了频率为 1000 和 200 Hz 的脉冲激光，也获得了等轴晶组织。可见，脉冲热源可有效获得等轴晶组织，且低频脉冲频率作用更为显著，但其细化晶粒的效果较为有限，通常相对非脉冲热源在一个数量级内。

增材制造小熔池逐点逐层堆积的特点，使得扫描策

略的优化变得更为灵活。近年来有研究者通过改变扫描策略，来获得等轴晶组织^[63]，但扫描策略和路径规划，多用于复杂结构件控制内应力和铝合金等材料的成形^[64-65]，目前相关报道中，这一方式对钛合金晶粒等轴化的作用较小^[53]。

此外，增大送粉速率或铺粉厚度也可以提高等轴晶的比例^[30,40]，图 3e 为增大送粉速率提高熔池顶部等轴晶。相关研究发现，元素粉末混合相对于预合金化粉末更容易获得细小等轴晶组织^[21,66-68]。而混粉方式中，卫星粉相对于直接机械混粉会有更佳的晶粒细化和等轴化效果^[69]。但在随后的粉末熔化过程中，混合元素粉中高熔点合金粉往往不能充分熔化，导致最终凝固组织不均匀^[69-70]，这些未熔粉末颗粒可能会成为合金协调变形的

薄弱区。

此外, Shi 等^[71]通过激光光线追踪、超快速流体流动和元胞自动机模拟指出, 熔池形状与最终凝固组织的柱状晶/等轴晶比例密切相关, 横向椭圆光束产生的熔池形状沿扫描方向、横向和沉积方向分别更短、更宽和更浅, 其相对于纵向椭圆和圆形高斯更容易获得等轴晶组织。

工艺参数调控的方式具有成本低、不改变合金原成分等优点。然而, *G-R* 凝固图受合金成分影响^[18], 增材制造熔池凝固初期, 固有的高温梯度和低凝固速率难以改变, 因而熔池底部倾向于形成短柱状晶^[30]。对 TC17、TB6 等合金化程度较高的近 β 钛合金, 这一方式具有较宽的工艺窗口获得等轴晶^[72-76], 而对 TC4、TA15 等合金化程度较低但工程化应用很广泛的合金, 可调控的工艺窗口较窄^[45,48,77]。

2.2 微合金化改性及新合金成分设计

微合金化是一种较低成本的合金晶粒调控手段, 也可以为新合金成分设计提供指导。当前多数金属增材制造工艺中所用合金仍然是基于传统的铸造、锻造等工艺所设计的, 这些合金成分可能无法充分发挥增材制造工艺的优势, 因而开发增材制造专用合金成分, 也成为了一个新的研究热点^[78-79]。相关研究在易开裂的高强铝合金和高温合金中开展较多, 而增材制造专用钛合金成分设计依然较少。当前针对增材制造钛合金的微合金化改性和合金成分设计主要基于 The Independent Theory 以获得全等轴晶组织^[80-81]。如图 4a 所示, 该理论认为金属凝固过程形核与过冷相互依赖: 凝固中液固界面的推进促进其前沿液相中的成分过冷, 从而激活液相中的粒子形核, 形成新的晶粒; 新的晶粒又反过来促进成分过冷的形成和增大。这一理论给出了量化的物理模型: 晶粒尺寸 d_{gs} 和生长限制因子 Q 成反比关系, 也指出了形核和成分过冷两者对于凝固中的柱等转变均十分重要。之后这一理论也被应用于增材制造中, 研究者们发现, Q 值大的合金, 可以在液固界面前沿快速建立成分过冷, 从而有效限制柱状晶的外延生长, 获得等轴晶组织^[82-83]。这也解释了相同工艺参数下近 β 和 β 钛合金更倾向于形成等轴晶的现象: 因为大部分 β 稳定元素具有较高的 Q 值。因而合金化改性和新合金成分设计中, 高 Q 值元素如 Mo^[21,67]、W^[70,83]、Fe^[84-86]、Cu^[78,87]、B^[88-93]、C^[94]和 Si^[81]等获得较多的关注^[78]。另一方面, 高熔点粒子如 W^[70]、Nb^[95]、稀土氧化物^[93,96-97]等, 与可通过化学反应生成形核粒子的元素如 N^[98-99]、稀土^[93,100]等, 也受到关注(图 4b~4d), 但不同粒子的细化晶粒效果存在较大差别, 一般而言, 微纳米尺寸的粒子具有更优异的晶粒细化效果^[98,101]。此外, 多项研究指出, 单一的过冷或者

单一的形核, 难以获得有效的等轴晶组织, 而两者的结合会获得比较好的效果^[99,101-102]。也有学者认为, 凝固温度区间 ΔT_f 相对于 Q 值更适合用于预测等轴晶形成趋势^[103]。

微合金化改性方面, 对 TC4、纯钛等原始 Q 值极低的金属^[78], 在不显著改变合金成分的情况下, 为大幅提升 Q 值以获得等轴晶组织, 通常会添加 B、C 等元素, 其易与 Ti 结合形成脆性强相 TiB、TiC^[88,90]。当添加量处于亚共晶相区时, 这些强化相一般形成于凝固后期的共晶凝固阶段, 并未作为 β 相的形核粒子^[104]。但在提升合金强度的同时, 会显著降低合金的塑韧性, 多数研究发现, B 含量在 0.1% (质量分数) 左右可以不损伤甚至轻微改善合金塑性^[105-108]。但这一较低的添加量, 需要通过微纳米粒子硼原料与基体合金粉末通过卫星粉、含硼聚合物涂料刷丝或机械球磨等方式充分混合, 才可以实现比较好的等轴化效果^[98,109-110]。而通常添加 β 稳定元素显著提升 Q 值需要较高的添加量, 但高添加量则会带来 α/β 两相比例的变化, 甚至形成全 β 晶粒, 对合金的力学性能产生显著影响^[111-114]。

综上所述, 微合金化可以有效获得细化的等轴晶, 同时实现晶粒细化和消除各向异性。但合金元素的添加往往会带来合金组织和力学性能的改变, 与原合金有一定甚至较大的差异。因而, 这一手段更适用于新合金的成分设计。

2.3 外加能量场

通过外加能量场的方式, 将能量输入到熔池中作用于凝固过程或后续循环热影响过程, 也可促进等轴晶的形成。除前述脉冲激光和脉冲电弧对熔池有一定的搅拌作用外, 当前采取的外加能量场主要有电磁场、超声波和低频机械振动等。外加电磁场作用机制主要为电磁力搅拌作用促进熔体热电磁对流破碎柱状枝晶, 降低熔池内温度梯度, 改变液固界面形貌, 从而促进等轴晶的形成^[115-118]。而超声波的作用机制主要包括声流、空化和振动加速度等, 声流作用可促进熔体流动以降低温度梯度, 空化作用可以促进枝晶的破碎, 其作用机制与电磁场有相似之处^[24,38,119-121]。因外场辅助的相关研究相对较少, 而增材制造钛合金和钢、镍基高温合金的柱等转变又有一定的相似性, 所以下文的讨论中, 也引用了部分后 2 种材料的相关文献。

在电磁场辅助增材制造中, Huang 等^[122]和 Zhao 等^[123]分别在 SLM 和 LDED 制备 TC4 合金中, 施加了沿着垂直于沉积方向的 0~0.3 T 和 0.5 T 的磁场, 发现晶粒尺寸细化, 但依然为柱状晶。在 LDED 制备的 Inconel 625 合金中, 施加了沿着搭接方向的 20 mT 的磁场, 枝晶组织细化, 枝晶偏析减弱^[118]。于群等在激光熔化沉积 Ni45 合金中, 施加了 0~80 mT 的搅拌磁场, 凝固组织细化^[116]。

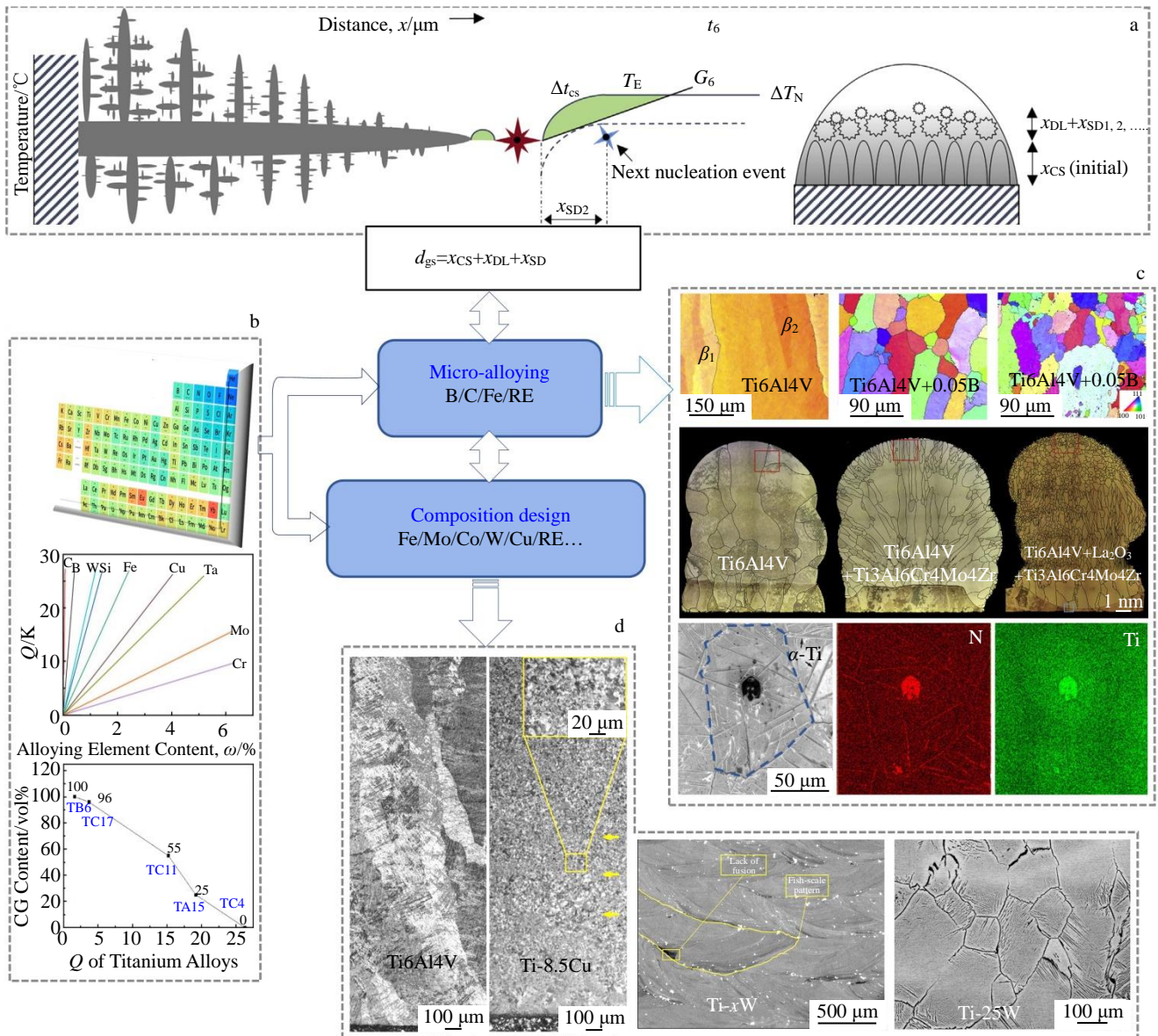


图 4 微合金化与合金成分设计获得等轴晶

Fig.4 Micro-alloying and composition design: (a) schematic diagram of the interdependence theory^[80-81]; (b) periodic table of elements, relationship between Q value and alloying element content, and the volume fraction of CG vs Q of titanium alloys; (c) morphologies of Ti6Al4V alloy with different B additions, Ti6Al4V alloy with Ti3Al6Cr4Mo4Zr and La₂O₃ additions, and TiN nucleation center in titanium; (d) microstructures of Ti6Al4V, Ti-8.5Cu, Ti-xW, and Ti-25W alloys^[82-100]

Lu 等^[124]在激光熔化沉积奥氏体不锈钢中，分别施加了静电场、旋转电场、静磁场、旋转磁场、静电磁场和旋转电磁场，获得了不同的枝晶细化效果，如图 5a 所示。程洪茂等^[125]在激光修复 Inconel 718 合金中，施加了 15 Hz, 0~60 A 的电磁搅拌，柱状组织变为等轴状。电磁场辅助增材制造可以有效地改变枝晶形貌与析出相尺寸，但晶粒细化效果一般。这可能与热电磁力对熔体的搅拌作用较低有关，如图 5b 所示，其所产生的加速度，远低于后文所述的超声波振动^[123,126]。

在机械场辅助增材制造方面，许多研究者通过用超声波工具头冲击基板或已凝固部分，将机械振动引入熔池作用于凝固过程，图 6a~6c 所示为不同的超声波导入方式及晶粒调控效果。Cong 等^[24,126-129]对超声波辅助沉积工艺 (UV-A LENS) 开展了较多研究，其通过底部基板引入超声波振动而制备 Inconel 718 合金，细化了晶粒和组织。Todaro 等^[37-38]在增材制造 TC4、316L 不锈钢合金中也从底部基板引入沿沉积方向振动的超声波，使得合金凝固晶粒明显细化，形成全等轴晶组织；在

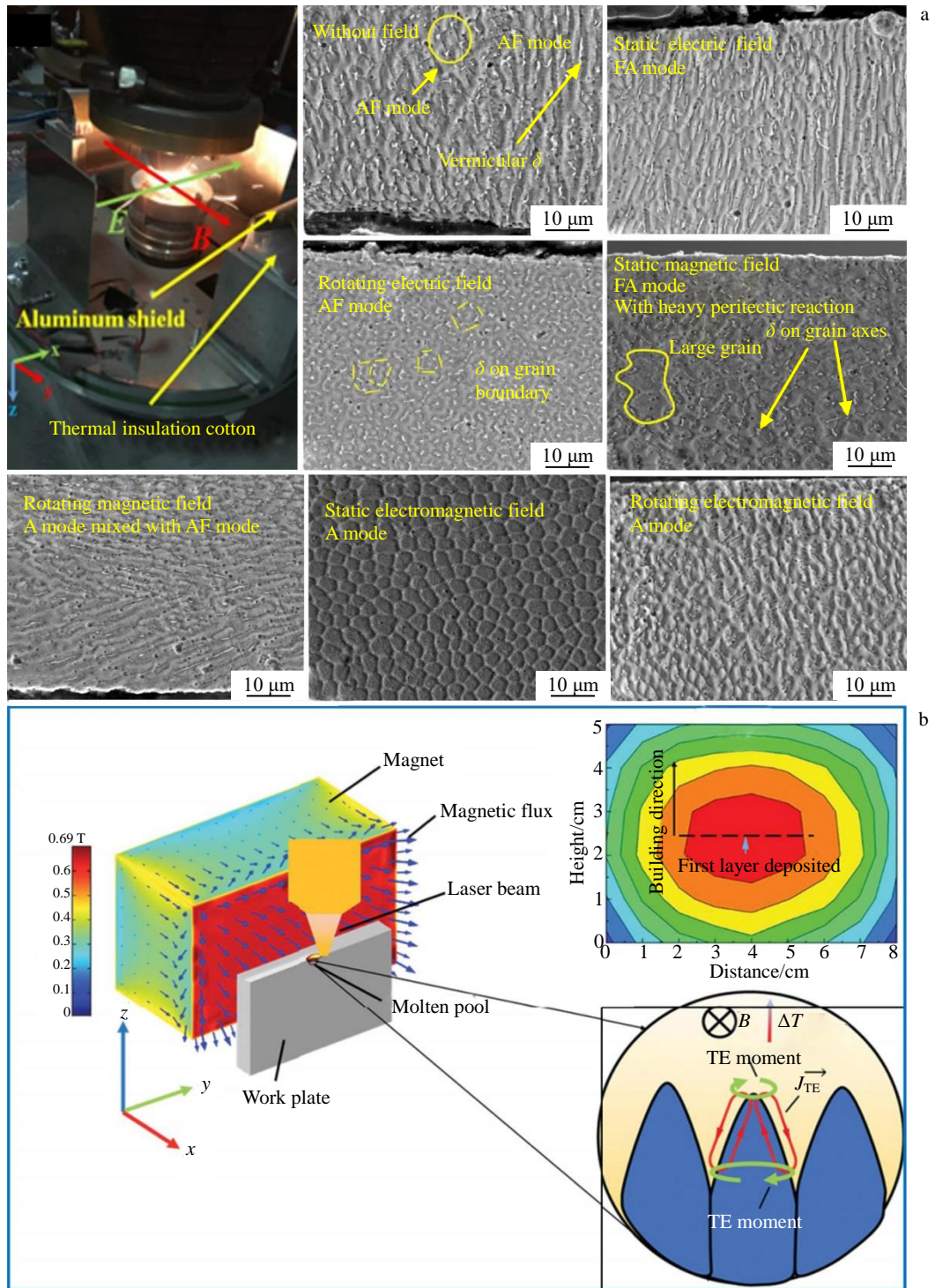


图 5 施加不同类型的电磁场对奥氏体不锈钢凝固组织的影响及磁场对熔体中枝晶的作用机制示意图

Fig.5 Effect of different electromagnetic fields on the solidification structure of austenitic stainless steel^[124] (a); mechanism of the effect of magnetic field on dendrites^[125] (b)

Inconel 625 合金中通过开关超声设备实现了柱等组织的交替。许明方等^[130]通过超声波振动垂直冲击基板, 在 CMT-WAAM 的 TC4 中获得了细化的等轴晶组织, 性能得到提升。Zhu 等^[131]在侧向引入振动方向水平垂直于扫描方向的超声波, 用于激光熔覆 Inconel 718 合金, 发现

晶粒尺寸细化为未施加振动合金的 52%。关于超声波的作用机制, Cong^[22]和 Todaro^[37]等归纳为声流和空化作用图 6d~6e; 而王维、岳耀猛等^[120,121]研究了超声振动对激光熔池的影响, 结合 FLUENT 对熔池温度场、流场进行了模拟, 发现超声振动改变了熔池形状, 熔池宽度变

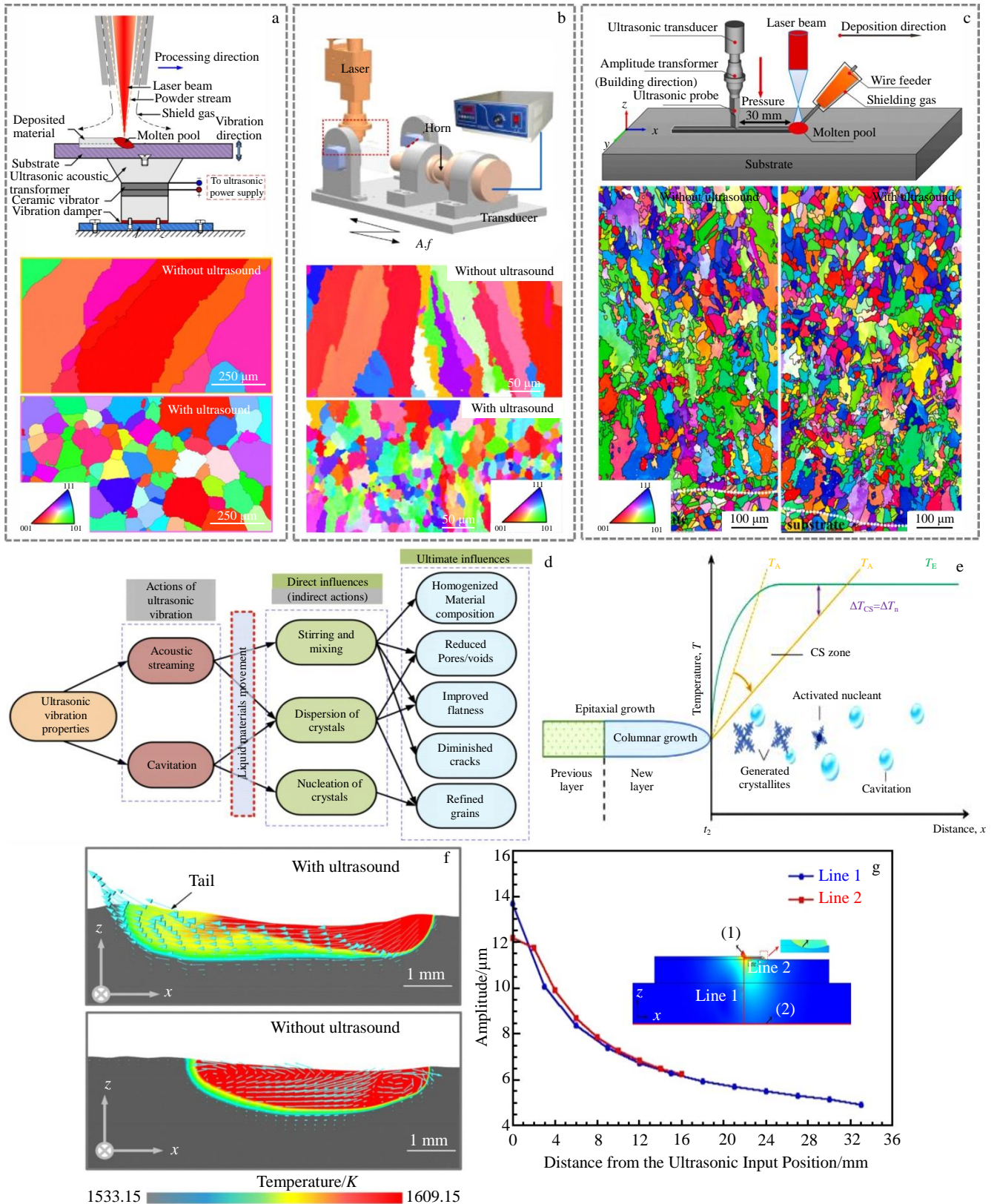


图 6 超声波振动辅助增材制造工艺、晶粒调控效果及作用机制示意图

Fig.6 Ultrasonic vibration-assisted additive manufacturing process, grain control effect and mechanism diagrams: (a) bottom vibration; (b) lateral vibration; (c) top vibration^[24,126-129]; (d) ultrasonic vibration mechanism; (e) schematic diagram of ultrasonic flow and cavitation^[24,37,120-121]; (f) simulation of temperature field and flow field in molten pool under ultrasonic vibration^[126]; (g) amplitude vs propagation distance^[119,132]

大，深度减小。在超声场作用下，熔池内部温度略有下降，温度梯度降低，熔体流速增加，对流加剧。Yang 等^[126]则基于高速相机和 FLOW-3D 分析了侧向振动下超声波诱导惯性力对熔池多物理场的影响（图 6f）。Yuan 等^[119,132]在沉积试样顶部，距离熔池 20 mm 处施加倾斜 45° 超声波振动，获得了等轴晶组织，但这种振动方式的晶粒细化效果不明显，通过计算发现超声波振幅随传播距离衰减较为明显（图 6g）。超声波作为高频机械振动，在固态金属中因吸收导致的振幅衰减较为明显，以上研究所制备的均为小尺寸试样。从底部和侧向引入振动的方式可获得较好的晶粒细化效果但衰减也最为明显，试样尺寸受到限制。而顶部引入超声波振动，虽然可以略微改善振幅（能量）衰减，但晶粒细化效果不显著。

另一类超声波应用于增材制造晶粒调控的手段，克服了超声波衰减的问题：采用逐层沉积后施加超声波轧制/冲击的方式，在凝固组织中引入强烈的塑性变形，使其在后续沉积层的加热中，发生再结晶而产生细小等轴

晶^[133]。如图 7 所示，Zhang 等^[134]和何智等^[135]分别在在选区激光熔化和电弧丝增材制造制备的 TC4 钛合金中，通过上述方式获得了细小的柱状交替组织和等轴晶组织，然而对能量密度较高的 SLM 工艺这一手段还是难以获得全等轴晶组织；在何智等人的研究中，需要反复多次的冲击才能降低两方向力学性能各向异性，而且多次冲击后试样较沉积态有较大的塑性损失。

此外，应用于传统合金凝固中的低频机械振动，也被应用于增材制造的研究中^[136-138]。叶国威等在激光增材制造 In625 合金中，施加了垂直方向的 50~300 Hz 的机械振动，外延生长的粗大柱状晶被打断，但并未形成等轴晶组织^[139]。

2.4 后续热处理

增材制造过程的快速加热和冷却导致沉积态构件中通常具有较高的内应力，一般较低温度的去应力退火可消除内应力。而典型的 $\alpha+\beta$ 双相钛合金，可通过在两相区上部退火，获得具有蟹爪状初生 α 和精细 β 转变组织的特种双态组织，获得优异的综合力学性能^[11]。但由于

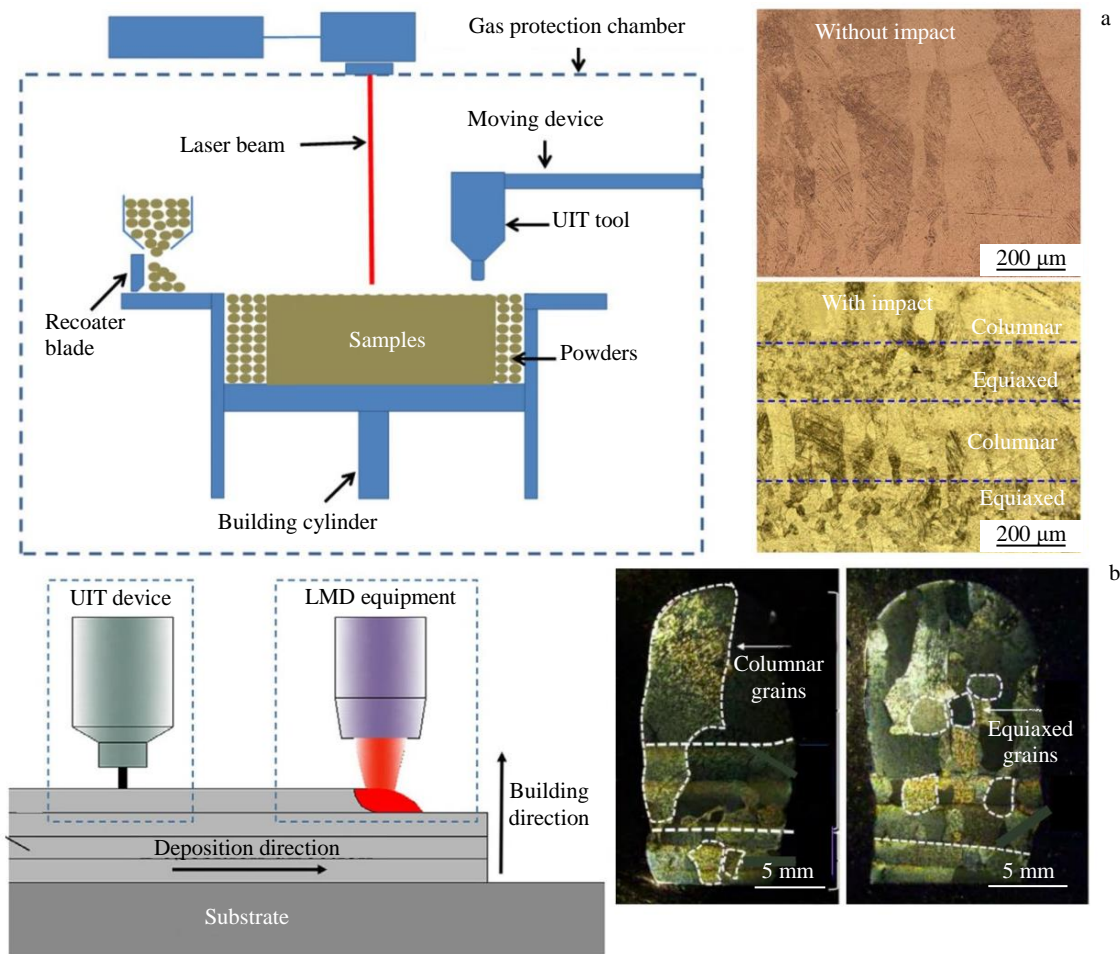


图 7 超声波冲击辅助增材制造及晶粒调控效果

Fig.7 Effects of ultrasonic impact on additive manufacturing and grain regulation: (a) powder bed laser fusion^[134] and (b) wire and arc additive manufacturing^[25,135]

晶界 α 的存在, 低于 β 相变温度的热处理, 通常无法有效改变晶粒形貌。因而, 多位研究者开展了增材制造双相钛合金在 β 相变点以上热处理的相关研究, 发现高于相变点一定温度的短时保温, 可导致原始 β 晶粒等轴化, 见图 8^[11,22,63,140-141]。然而, 高于 β 相变点的热处理, 易导致晶粒的长大以及魏氏组织的生成, 从而降低合金的强度和塑性^[11]。Chen 等^[142]发现 SLM 制备的纯钛在 700 °C 短时保温可以获得较细小的等轴晶, 但这一热处理导致了一定的强度损失。此外, 对大型构件的热处理, 钛合金的热导率较低, 难以在较短的时间内获得均匀的温度场, 也可能导致热处理组织的不均匀或晶粒长大。

2.5 新兴增材制造工艺

随着增材制造行业的快速发展, 一些技术也被应用于金属增材制造成形而形成新的增材制造工艺, 如图 9 所示的埋弧增材制造、搅拌摩擦焊增材制造, 以及超声

波叠层焊增材制造等^[143], 其中部分技术应用于钛合金, 可以有效促进晶粒等轴化。如 Yang 等^[144]使用同轴送丝电弧增材制造方式制备了 TC4 合金, 获得了近全等轴晶组织, 试样各向异性较低。Lin 等^[145]使用等离子弧增材制造技术制备 TC4 合金, 通过逐层降低热输入, 可获得长径比较低的原始 β 晶粒。Farabi 等^[146]使用搅拌摩擦焊增材制造方式制备了 TC4 试样, 获得了尺寸为几十微米的细小等轴晶组织, 室温拉伸力学性能优异。而 Zhang 等^[20]使用埋弧增材制造的方式制备了 EM12K 低碳钢, 由于原位固有热处理的作用, 发生了等轴化相变, 获得了细小 α -Fe 等轴晶组织, 各向同性较好。此外, 激光摆动也被应用于增材制造中, 除消除匙孔外^[147], 也对调控凝固晶粒形貌有一定作用。方远志等^[148]在激光熔化沉积 TC4 合金中, 对激光器施加了频率 200 Hz、振幅 1.5 mm 的摆动, 使得凝固晶粒中柱状晶尺寸减小且发生等轴化。

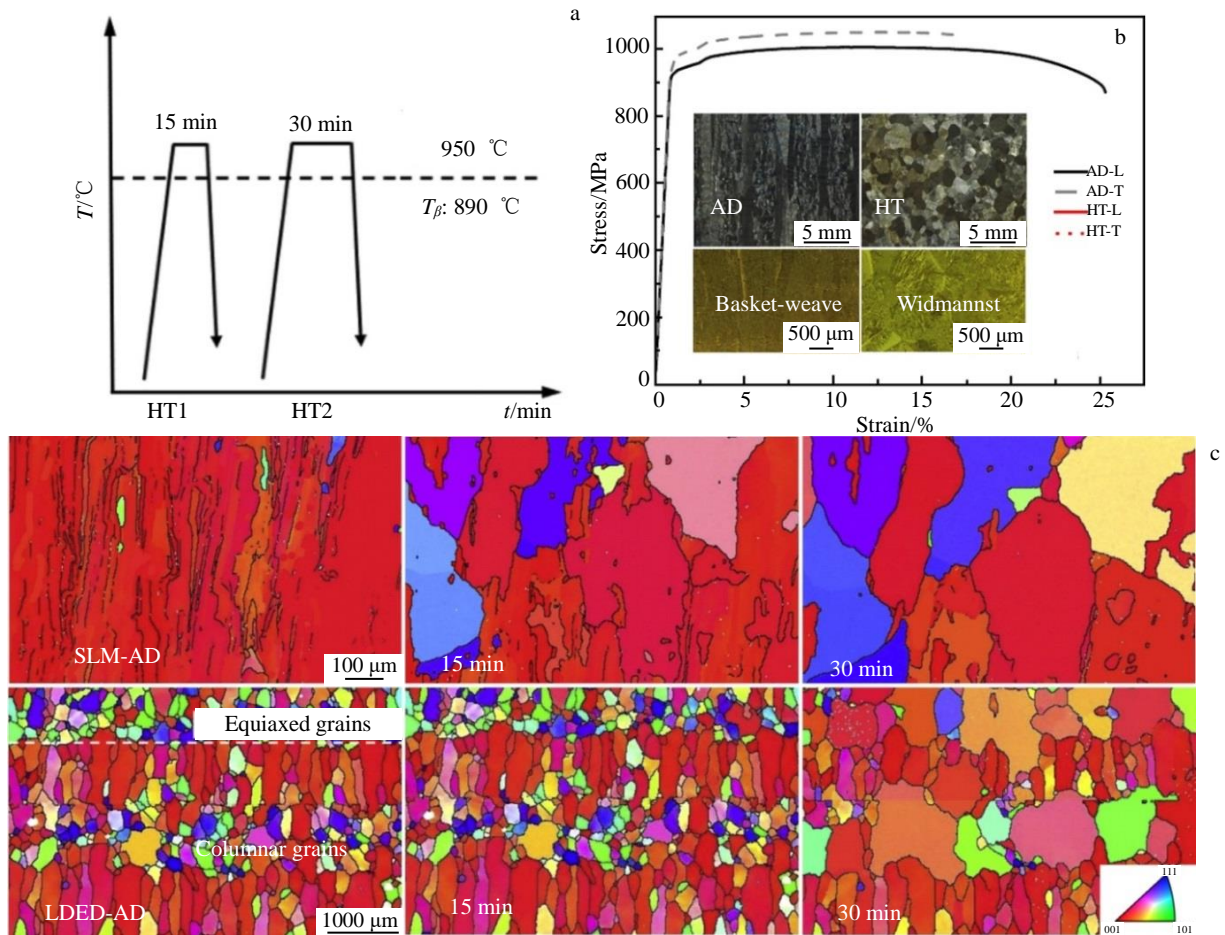


图 8 后续热处理示意图、沉积态 (AD) 与热处理态 (HT) 分别沿沉积方向 (L) 和垂直于沉积方向 (T) 的室温拉伸曲线与典型微观组织及 SLM 和 LDED 的沉积态和相变点以上保温 15、30 min 的原始 β 晶粒形貌 EBSD 照片

Fig.8 Subsequent heat treatment and resultant microstructures^[11,22,63,140-141]: (a) schematic diagram of heat treatment; (b) stress-strain curves and typical microstructures of the as-deposited (AD) and heat-treated (HT) alloys at room temperature along the deposition direction (L) and the direction perpendicular to the deposition direction (T)^[11]; (c) EBSD images of original β grain morphology for SLMed and LDEDed alloys before and after heat treatment

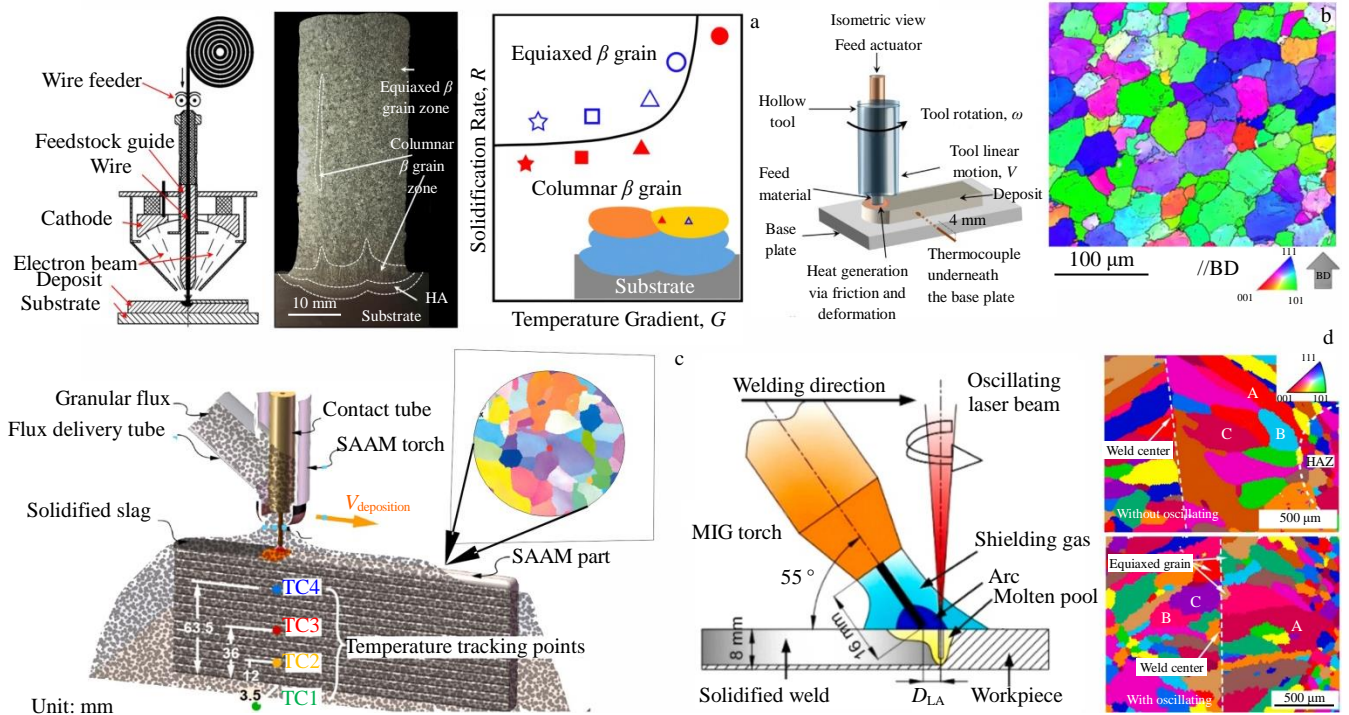


图 9 几类新型增材制造工艺及其所制备材料的凝固晶粒形貌

Fig.9 Several new additive manufacturing methods and corresponding solidification grain morphologies^[143-149]: (a) coaxial electron beam wire feeding additive manufacturing; (b) additive friction stir deposition; (c) submerged arc additive manufacturing; (d) oscillating laser additive manufacturing

Lei 等^[149]在激光焊接 $\beta 21S$ 钛合金中，沿着扫描方向和垂直扫描方向，施加了频率 20~150 Hz、振幅 0.5~2 mm 的激光摆动，促进了焊接头处等轴晶组织的形成，改善了接头性能。以上新型工艺，部分是使用了新型热源，部分是将其他制备成形工艺中的手段引入增材制造中，这对改变增材制造固有的熔池底部高温梯度从而调控凝固晶粒有着可观的前景。

2.6 多种方法复合

以上单一的手段有时难以获得理想的晶粒调控效果，部分研究者们同时叠加使用了 2 种以上的调控手段。如 Zhuo 等^[150-151]使用低频脉冲电弧沉积微量硼改性的 TC11 合金，获得了比较好的晶粒调控效果。但这一研究结果中，各类方法作用效果也并非简单的叠加关系，甚至可能相互抵消。如脉冲电弧与 La_2O_3 形核粒子共同作用后，晶粒形貌反而从只添加 La_2O_3 时的近等轴组织转化为柱状晶组织。因而，深入研究各类作用方式的机制和复合使用时的相互干涉，是实现复合的重要基础。值得一提的是，在增材制造中，极快的冷却速率使得热过冷值相对于成分过冷值的比例较铸造等传统凝固显著提升。Prasada 等^[152]指出，热过冷在特定条件下可替代成分过冷处于主导地位，通过激光熔覆在 Al-Cu 合金表面添加晶粒细化剂 Al-3Ti-1B，在热过冷和成分过冷的共同作用下，获得了超细等轴晶组织^[153]。这对钛合金

的工艺参数优化和微合金化结合使用来更好地调控晶粒形貌，也给出了一定的启示。

3 各种方法晶粒调控效果评价

本节将前文所引相关文献中的钛合金晶粒尺寸与等轴晶比例绘图进行了对比，如图 10a 所示，以晶粒尺寸降低和等轴晶比例提高为调控目标，图 10a 中所列为相应文献中的最佳调控效果，而非调控前后的对比。由于混合粉末和脉冲热源 2 类较为特殊，因而在工艺参数优化外单独列出。此外，图中还根据文献绘制了各类方法调控效果大致的分布区域轮廓图，以便下文的对比分析。由图可见，各类调控方法均可获得较高比例的甚至全部的等轴晶，但晶粒尺寸的差异较大。工艺参数优化可获得较高的等轴晶比例，但晶粒尺寸一般在 100~1000 μm 。事实上，工艺参数优化也有较宽的晶粒调控效果范围，但本文所列的是其中调控效果较好的文献结果。而其中脉冲热源和元素粉末混合的方式，往往可以获得全等轴晶组织。微合金化和成分设计的方法，调控效果的范围较宽，这与合金元素的多样性有关，而这一方法的突出优势是可以获得极细的等轴晶组织，晶粒尺寸甚至可达 10 μm 以下，这与高 Q 值形成的极大的成分过冷和微纳米粒子添加有效细化晶粒有关。外场辅助方式的调控效果范围较宽，其晶粒细化效果一般，当前相关研究依然

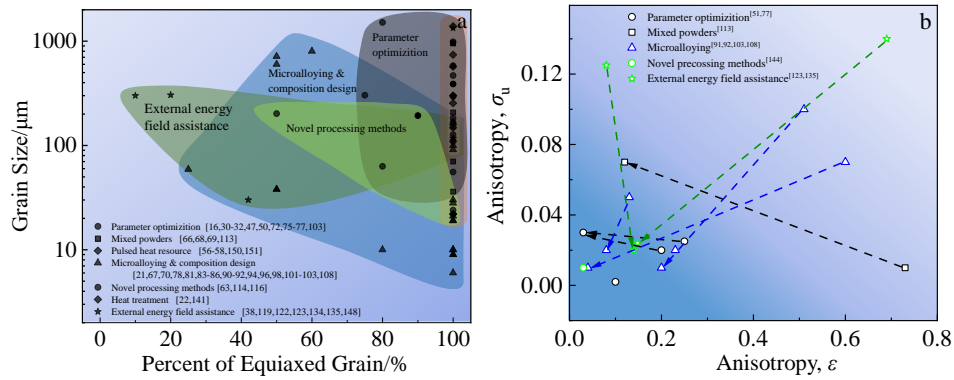


图 10 各种调控晶粒方式的调控效果及力学性能各向异性对比

Fig.10 Control effects and anisotropy of mechanical properties of various grain control methods: (a) relationship between grain size and percent of equiaxed grains; (b) relationship between anisotropy of ultimate strength and that of tensile elongation during tensile test at room temperature (the data group marked by the dotted arrow indicates the comparison before and after regulation, and the single data point without the arrow shows the result after regulation)

较少, 尚未形成系统化成果, 仍有较大的发展空间。后续热处理方式的调控效果与脉冲热源相当。本文所引几种新型增材制造工艺的晶粒调控效果也较好, 可获得较细的晶粒尺寸和较高的等轴晶比例。

当前关于晶粒调控后力学性能各向异性的研究依然较少, 基本局限于室温拉伸性能, 图 10b 为不同方向室温拉伸的断裂强度和延伸率各向异性, 计算方法分别为:

$$\text{Anisotropy } (\sigma_u) = (\sigma_{u,\max} - \sigma_{u,\min}) / \sigma_{u,\max} \quad (1)$$

$$\text{Anisotropy } (\epsilon) = (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) / \epsilon_{\max} \quad (2)$$

式中, Anisotropy (σ_u), Anisotropy (ε) 分别为断裂强度和延伸率的各向异性, σ_u 为断裂强度, ε 为断后延伸率, 下标 max 和 min 分别代表所测试不同方向相应物理量的最大值和最小值。可见, 大多数方法都可以显著降低强度各向异性和塑性各向异性, 获得近各向同性的性能。工艺参数优化的调控能力较为有限, 而微合金化和外场辅助方式, 有显著的改善各向异性的效果。但因为可参考的已发表相关研究较少, 本文尚未就各种方式对力学性能各向异性的调控效果进行深入评价。

4 结果与展望

增材制造钛合金凝固柱状晶导致的各向异性问题是近些年的研究热点。国内外研究者们从多个方面开展了大量的研究, 取得丰富成果。整体而言, 对合金化程度较高的近β和β钛合金的晶粒调控难度较低; 而对以TC4为代表的得到广泛工程化应用的α+β钛合金的晶粒调控研究较多。工艺参数优化方面, 获得等轴晶的手段已经突破了传统的多个基础工艺参数的线性调控, 变得更加灵活。而基于 The Interdependent Theory 的合金化, 同时适用于粉末床熔覆和同轴送粉/丝 2 类增材制造工艺, 是

调控凝固晶粒的有效手段, 为增材制造专用合金设计提供了丰富的参考。外场辅助增材制造的手段多样, 在调控晶粒形貌的同时, 往往还兼有消除偏析和气孔等凝固缺陷、破碎析出相的作用。但电磁场辅助和低频机械振动手段的晶粒细化效果有限, 而超声波振动尚未有效解决能量衰减问题, 因而尚需进一步的深入研究, 解决相关问题。此外, 基于对增材制造过程中合金凝固机制深入认识的仿真模拟手段, 可以较为准确地预测实验结果, 降低实验成本, 缩短研究周期, 对相关研究的开展具有重要辅助作用。

此外, 双相钛合金的β-α相变中可能会存在变体选择和织构遗传问题, 因而对消除最终构件的力学性能各向异性而言, 获得等轴原始β晶粒只是其中的一种手段或实现这一目标的重要一步。对获得的等轴晶组织的合金进行后续的其他处理和力学性能评价, 以期获得目标性能而实现工程化应用, 需通过后续多方面研究实现。

参考文献 References

[1] Wang Huaming(王华明). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2014, 35(10): 2690
 [2] Lin Xin(林鑫), Huang Weidong(黄卫东). *Scientia Sinica Informationis* (中国科学: 信息科学)[J], 2015, 45(9): 1111
 [3] Lu Bingheng(卢秉恒), Li Dichen(李涤尘). *Machine Building and Automation* (机械制造与自动化)[J], 2013, 42(4): 4
 [4] Gu Dongdong(顾冬冬), Zhang Hongmei(张红梅), Chen Hongyu(陈洪宇) et al. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2020, 47(5): 24
 [5] Dirk H, Vanessa S, Eric W et al. *Acta Materialia*[J], 2016, 117: 371

- [6] Li Yadi(李雅迪), Mi Guangbao(弭光宝), Li Peijie(李培杰) *et al. Rare Metal Materials And Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2022, 51(7): 2507
- [7] DebRoy T, Mukherjee T, Milewski J O *et al. Nature Materials*[J], 2019, 18(10): 1026
- [8] Wang Huaming(王华明), Zhang Shuquan(张述泉), Wang Tao(王韬) *et al. Journal of Xihua University, Natural Science Edition(西华大学学报, 自然科学版)*[J], 2018, 37(4): 9
- [9] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R *et al. Science*[J], 2021, 372 (6545): 1
- [10] Zhu Y Y, Tian X J, Li J *et al. Materials & Design*[J], 2015, 67: 538
- [11] Wilson-Heid A E, Qin S P, Beese A M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 738: 90
- [12] Wang K, Bao R, Liu D *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 746: 276
- [13] Lu J X, Chang L, Wang J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 712: 199
- [14] Li R K, Wang H M, He B *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 824: 141 771
- [15] Deng H, Qiu W B, Cao S *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 858: 158 351
- [16] Zhao E T, Sun S C, Zhang Y. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 14: 3029
- [17] Zhang Anfeng(张安峰), Zhang Jinzhi(张金智), Zhang Xiaoxing(张晓星) *et al. Journal of Netshape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2019, 11(4): 8
- [18] Collins P C, Brice D A, Samimi P *et al. Annual Review of Materials Research*[J], 2016, 46(1): 63
- [19] Liu P W, Wang Z, Xiao Y H *et al. Additive Manufacturing*[J], 2019, 26: 22
- [20] Zhang F Y, Gao P P, Tan H *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 88: 132
- [21] Lu B W, Cui X F, Jiang L P *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 359: 125
- [22] Cong W L, Ning F D. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2017, 121: 61
- [23] Zhou C P, Jiang F C, Xu D *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2020, 280: 116 599
- [24] Qi M, Huang S S, Ma Y J *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 13: 1159
- [25] Li Y H, Wu S J, Li H L *et al. Additive Manufacturing*[J], 2021, 46: 102 124
- [26] Hunt J D. *Materials Science & Engineering A*[J], 1984, 65(1): 75
- [27] Kurz W, Bezençon C, G äumann M. *Science and Technology of Advanced Materials*[J], 2001, 2(1): 185
- [28] Wei H L, Elmer J W, Debroy T. *Acta Materialia*[J], 2016, 115: 123
- [29] Raghavan N, Dehoff R, Pannala S *et al. Acta Materialia*[J], 2016, 112: 303
- [30] Wang T, Zhu Y Y, Zhang S Q *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 632: 505
- [31] Wang J, Lin X, Wang J T *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 768: 97
- [32] Yang Haiou(杨海欧), Wang Jian(王健), Wang Chong(王冲) *et al. Materials Reports(材料导报)*[J], 2018, 32(12): 2028
- [33] Zhu Y Y, Liu D, Tian X J *et al. Materials & Design*[J], 2014, 56: 445
- [34] DebRoy T, Wei H L, Zubac J S K *et al. Progress in Materials Science*[J], 2018. 92: 112
- [35] Gremaud M, Carrard M, Kurz W. *Acta Metallurgica et Materialia*[J], 1990, 38(12): 2587
- [36] Bai X W, Colegrove P, Ding J L *et al. International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2018, 124: 504
- [37] Todaro C J, Easton M A, Qiu D *et al. Additive Manufacturing*[J], 2020, 137: 101 632
- [38] Todaro C J, Easton M A, Qiu D *et al. Nature Communications*[J], 2020, 11(1): 142
- [39] Liu Z Y, Zhao D D, Wang P *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 100: 224
- [40] Qiu C L, Liu Q. *Additive Manufacturing*[J], 2019, 30: 100 893
- [41] Gibson I, Rosen D, Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*[M]. Berlin: Springer, 2015
- [42] Shamsaei N, Yadollahi A, Bian L K *et al. Additive Manufacturing*[J], 2015, 8: 12
- [43] Saboori A, Gallo D, Biamino S *et al. Applied Sciences*[J], 2017, 7(9): 883
- [44] Yang L, Hsu K, Baughman B *et al. Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*[M]. Berlin: Springer, 2017
- [45] Kobryn P A, Semiatin S L. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 135(2-3): 330
- [46] Kurz W, Bezençon C, G äumann M. *Science and Technology of Advanced Materials*[J], 2001, 2: 185
- [47] Li Liqun(李俐群), Wang Jiandong(王建东), Wu Chaochao(吴潮潮) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2017, 44(3): 119
- [48] Bontha S, Klingbeil N W, Kobryn P A *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 513-514: 311
- [49] Akram J, Chalavadi P, Pal D *et al. Additive Manufacturing*[J], 2018, 21: 255
- [50] Li Z X, Liu C M, Xu T Q *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 742: 287
- [51] Wang J, Lin X, Li J Q *et al. Materials Science and Engineering*

- A[J], 2020, 772: 138 703
- [52] Zhang Q, Chen J, Lin X *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 238: 202
- [53] Wang Jian(王 健), Lin Xin(林 鑫), Xue Aitang(薛爱堂) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(3): 857
- [54] Yan Zhenyu(严振宇), Zhou Qingjun(周庆军), Hou Yifei(侯谊飞) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2018, 45(11): 8
- [55] Du Zijie(杜子杰), Li Wenyuan(李文渊), Liu Jianrong(刘建荣) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2020, 56(12): 14
- [56] Sundaresan S, Ram G D J, Reddy G M. *Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 262: 88
- [57] Wang F D, Williams S, Rush M. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2011, 57(5-8): 597
- [58] Mitzner S, Liu S, Domack M *et al.* *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference*[C]. Austin: University of Texas at Austin, 2012: 536
- [59] Wu Q R, Ma Z S, Chen G S *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2017, 27: 198
- [60] Guo J, Zhou Y, Liu C *et al.* *Materials (Basel)*[J], 2016, 9(10): 823
- [61] Chen D, Cai Y H, Luo Y *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 59: 587
- [62] Ravi G A, Qiu C L, Attallah M M. *Materials Letters*[J], 2016, 179: 104
- [63] Davis A E, Kennedy J R, Strong D *et al.* *Materialia*[J], 2021, 20: 101 202
- [64] Lehmann T, Rose D, Ranjbar E *et al.* *International Materials Reviews*[J], 2021, 66: 1
- [65] Ma Qian(马 倩). *Investigation on Deposition Anisotropy and Path Planning of Wire and Arc Additive Manufacturing*(电弧增材制造成形方向特征及路径规划研究)[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016
- [66] Tan Hua(谭 华), Chen Jing(陈 静), Zhang Fengying(张凤英) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(4): 574
- [67] Xu H, Li Z J, Dong A P *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 873: 1
- [68] Zhang Fengying(张凤英), Tan Hua(谭 华), Chen Jing(陈 静) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2012, 48(2): 159
- [69] Zhang F Y, Mei M, Al-Hamdani K *et al.* *Materials Letters*[J], 2018, 213: 197
- [70] Mendoza M Y, Samimi P, Brice D A *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2017, 48(7): 3594
- [71] Shi R P, Khairallah S A, Roehling T T *et al.* *Acta Materialia*[J], 2020, 184: 284
- [72] Wu X, Sharman R, Mei J *et al.* *Materials & Design*[J], 2004, 25(2): 103
- [73] Liu Bingsen(刘炳森), Zhang Shuquan(张述泉), Zhang Jikui(张纪奎) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2022, 49(14): 1 402 204
- [74] Zhu Y Y, Chen B, Tang H B *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28(1): 36
- [75] Qiu C L, Ravi G A, Attallah M M. *Materials & Design*[J], 2015, 81: 21
- [76] Zhu Y Y, Tang H B, Li Z *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 777: 712
- [77] Zhang G H, Lu X F, Li J Q *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2022, 55: 102 865
- [78] Zhang D, Qiu D, Gibson M A *et al.* *Nature*[J], 2019, 576: 91
- [79] Zhang T L, Liu C T. *Advanced Powder Materials*[J], 2021, 1: 100 014
- [80] StJohn D H, Qian M, Easton M A *et al.* *Acta Materialia*[J], 2011, 59(12): 4907
- [81] Mereddy S, Bermingham M J, StJohn D H *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 695: 2097
- [82] Easton M A, Qian M, Prasad A *et al.* *Current Opinion in Solid State and Materials Science*[J], 2016, 20(1): 13
- [83] Rolchigo M R, LeSar R. *Computational Materials Science*[J], 2019, 163: 148
- [84] Simonelli M, McCartney D G, Barriobero-Vila P *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2020, 51(5): 2444
- [85] Qi P, Li B L, Wang T B *et al.* *Materials Characterization*[J], 2021, 171: 110 729
- [86] Wang X, Zhang L J, Ning J *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 48: 102 442
- [87] Song W, Wang H, Li Y *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 129: 240
- [88] Bermingham M J, Kent D, Zhan H *et al.* *Acta Materialia*[J], 2015, 91: 289
- [89] Mahbooba Z, Harvey W, Ola H *et al.* *JOM*[J], 2016, 69(3): 472
- [90] Mereddy S, Bermingham M J, Kent D *et al.* *JOM*[J], 2018, 70(9): 1670
- [91] Xue A T, Lin X, Wang L L *et al.* *Materials & Design*[J], 2019, 181: 107 943
- [92] Zhang K, Tian X, Bermingham M *et al.* *Materials & Design*[J], 2019, 184: 108 191
- [93] Bermingham M J, McDonald S D, Dargusch M S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 719: 1
- [94] Mantri S A, Alam T, Choudhuri D *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2017, 52(20): 12 455

- [95] Tedman-Jones S N, McDonald S D, Bermingham M J *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 794: 268
- [96] Zhang D Y, Dong Q, Gibson M A *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 841: 155 733
- [97] Ng C H, Bermingham M J, Yuan L *et al.* *Acta Materialia*[J], 2022, 224: 117 511
- [98] Chao Q, Srikanth M, Murugesan A *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 46: 102 173
- [99] Qiu D, Zhang D Y, Mark A E *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2018, 49(5): 1444
- [100] Yan W G, Wang H M, Tang H B *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2022, 32(5): 1501
- [101] Kennedy J R, Davis A E, Caballero A E *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 40: 101 928
- [102] Bermingham M J, StJohn D H, Krynen J *et al.* *Acta Materialia*[J], 2019, 168: 261
- [103] Deng M C, Sui S, Yao B *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 101: 308
- [104] Srinivasan R, Sesh T. *Scripta Materialia*[J], 2010, 63(12): 1244
- [105] Singh G, Upadrastra R. *Progress in Materials Science*[J], 2020, 111: 100 653
- [106] Huang Liguo(黄立国), Gao Zhiyu(高志玉), Fu Dajun(付大军). *Materials Reports(材料导报)*[J], 2015, 29(21): 92
- [107] Luo Hao(罗皓), Chen Zhiqiang(陈志强). *Development and Application of Materials(材料开发与应用)*[J], 2010, 25(4): 77
- [108] Qi Zhenjia(齐振佳), Zhang Xiaoxing(张晓星), Wang Yuyue(王豫跃) *et al.* *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2020, 47(6): 124
- [109] Yang Z W, Fu L Q, Wang S L *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 39: 101 883
- [110] Zhang K, Tian X, Bermingham M *et al.* *Materials & Design*[J], 2019, 184: 108 191
- [111] Zhuo Y M, Yang C L, Fan C L *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 888: 161 641
- [112] Chen F W, Gu Y L, Xu G L *et al.* *Materials & Design*[J], 2020, 185: 108 251
- [113] Choi G, Choi W S, Han J *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 36:101 467
- [114] Bermingham M J, McDonald S D, Dargusch M S *et al.* *Journal of Materials Research*[J], 2011, 23(1): 97
- [115] Li X, Fautrelle Y, Ren Z M. *Acta Materialia*[J], 2007, 55(11): 3803
- [116] Yu Qun(于群), Wang Cunshan(王存山). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2018, 45(4): 154
- [117] Cai B, Kao A, Boller E *et al.* *Acta Materialia*[J], 2020, 196: 200
- [118] Wang Y F, Chen X Z, Shen Q K *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 64: 10
- [119] Yuan D, Shao S Q, Guo C H *et al.* *Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2021, 73: 105 472
- [120] Wang Wei(王维), Yue Yaomeng(岳耀猛), Yang Guang(杨光) *et al.* *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2015, 42(11): 85
- [121] Yue Yaomeng(岳耀猛). *Research on Mechanism of Ultrasonic-assisted Titanium Alloy Laser Deposition Repair(超声辅助钛合金激光沉积修复机理研究)*[D], Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016
- [122] Huang W C, Chuang C S, Lin C C *et al.* *Physics Procedia*[J], 2014, 56: 58
- [123] Zhao R X, Chen C Y, Shuai S S *et al.* *Materials Research Letters*[J], 2022, 10(8): 530
- [124] Lu Y, Sun G F, Wang Z D *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2019, 119: 105 586
- [125] Cheng Hongmao(程洪茂), Liu Fencheng(刘奋成), Yang Guang(杨光) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(10): 2949
- [126] Yang Z C, Wang S H, Zhu L D *et al.* *Applied Physics Reviews*[J], 2022, 9(2): 021 416
- [127] Ning F D, Cong W L. *Materials Letters*[J], 2016, 179: 61
- [128] Ning F D, Hu Y B, Liu Z C *et al.* *Procedia Manufacturing*[J], 2017, 10: 771
- [129] Ning F D, Cong W L. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 51: 174
- [130] Xu Mingfang(许明方), Chen Yuhua(陈玉华), Deng Huaibo(邓怀波) *et al.* *Journal of Netshape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2019, 11(5): 142
- [131] Zhu L D, Yang Z C, Xin B *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 410: 126 964
- [132] Yuan D, Sun X J, Sun L B *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 813: 141 177
- [133] Sun L B, Guo C H, Huang L J *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 848: 143 382
- [134] Zhang M X, Liu C M, Shi X Z *et al.* *Applied Sciences*[J], 2016, 6(11): 304
- [135] He Zhi(何智), Hu Yang(胡洋), Qu Hongtao(曲宏韬) *et al.* *Aerospace Manufacturing Technology(航天制造技术)*[J], 2016(6): 11
- [136] Li C G, Sun S, Liu C M *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 794: 236
- [137] Xu Xinxin(许欣欣), He Wenxiong(贺文雄), Qin Jin(秦晋) *et al.* *China Surface Engineering(中国表面工程)*[J], 2019,

- 32(5): 127
- [138] Du Licheng(杜立成), Wang Meng(王 猛), Zhang Ying(张 莹) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys* (特种铸造及有色合金)[J], 2009, 29(4): 401
- [139] Ye Guowei(叶国威). *Research on Microstructure and Mechanical Properties of In625 Alloy Fabricated by Additive Manufacturing with Mechanical Vibration*(机械振动辅助激光增材制造 In625 合金的微观组织及力学性能基础研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [140] Liu C M, Yu L, Zhang A L *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 673: 185
- [141] Zou Z Y, Simonelli M, Katrib J *et al. Scripta Materialia*[J], 2020, 180: 66
- [142] Chen K W, Huang D J, Li H *et al. Scripta Materialia*[J], 2022, 209: 114 377
- [143] Fujii H T, Shimizu S, Sato Y S *et al. Scripta Materialia*[J], 2017, 135: 125
- [144] Zhang J H, Yang Y, Cao S *et al. Acta Metallurgica Sinica*[J], 2020, 33(10): 1311
- [145] Lin J J, Lv Y H, Liu Y X *et al. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2017, 69: 19
- [146] Farabi E, Babaniaris S, Barnett M R *et al. Additive Manufacturing Letters*[J], 2022, 2: 100 034
- [147] Wang L, Liu Y, Yang C G *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2021, 292: 117 053
- [148] Fang Yuanzhi(方远志), Dai Guoqing(戴国庆), Guo Yanhua(郭艳华) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2023, 59(1): 136
- [149] Lei Z L, Chen Y, Zhou H *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2022, 145: 7496
- [150] Zhuo Y M, Yang C L, Fan C L *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 805: 140 557
- [151] Zhuo Y M, Yang C L, Fan C L *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 888: 161 473
- [152] Prasad A, Yuan L, Lee P *et al. Acta Materialia*[J], 2020, 195: 392
- [153] Patel M N, Qiu D, Wang G *et al. Scripta Materialia*[J], 2020, 178: 447

Research Progress on Solidified Grain Control of Additively Manufactured Titanium Alloys

Yang Junwei¹, Tang Haibo^{2,3}, Tian Xiangjun^{2,3}, Zhu Yanyan^{2,3,4}

(1. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

(3. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China)

(4. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315832, China)

Abstract: Titanium alloys are prevalently applied in aerospace, ship, and nuclear power fields due to their excellent properties, such as high special strength, good corrosion resistance, and fine properties at elevated temperatures. Additive manufacturing technique provides a revolutionary way to process the large-scale integrate key parts of titanium alloys with short period and low cost. However, the coarse columnar grains produced in the forming process lead to the anisotropy of the components, which restricts the full play of the properties of the alloys. The methods to control the size and morphology of the grains for the purpose of anisotropy reduction and mechanical property enhancement are the research hotspot in recent years. This study described the feature and formation mechanism of typical grain microstructures in general additive manufacturing methods and summarized the grain-control methods, including the parameter optimization, novel processing methods, micro-alloying/new alloy composition design, subsequent heat treatment, external field assistance, and the combination methods. The grain regulation mechanisms were summarized and the control effects were evaluated. This research progress provides direction and prospect for the further development in the control of solidified grains of additively manufactured titanium alloys.

Key words: additive manufacturing; titanium alloys; grain control

Corresponding author: Zhu Yanyan, Ph. D., Associate Professor, Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, E-mail: zhuyy@buaa.edu.cn